

Petrofacies cuantitativas a partir de análisis multivariado en la Formación Amagá

Autor: José Daniel Giraldo Gómez

201817505015

Director: Andrés Leonardo Cárdenas Rozo

Proyecto de grado

Departamento de Ciencias de la Tierra

Medellín, octubre 2021

Tabla de contenido

Resumen	5
1. Introducción.....	6
2. Antecedentes.....	8
3. Localización	8
4. Hipótesis	9
5. Objetivos	10
6. Geología Regional.....	10
7. Metodología.....	13
7.1. Datos.....	13
7.2. Procesamiento de datos	13
7.3. Interpretación de resultados	15
8. Resultados	16
9. Discusión	25
10. Conclusiones	29
11. Bibliografía	31

Lista de figuras

Figura 1. Mapa de localización de las columnas estratigráficas y muestras de rocas sedimentarias en la Formación Amagá.	9
Figura 2. a) Mapa tectonoestratigráfico de los Andes. b) Mapa geológico del área de estudio donde se observan ambos miembros de la Formación Amagá y demás formaciones adyacentes. Tomado y editado de Páez (2013) y Silva et al., (2008) respectivamente.	11
Figura 3. Diagrama de Dickinson (1985) donde se observa que las muestras presentan una concentración principalmente en el campo de erógeno reciclado.	16
Figura 4. Diagrama de dispersión y nivel de estrés entre las muestras de la Formación Amagá (0.091).	18
Figura 5. Diagrama de Shepard, la línea denota la regresión monótona (creciente) de mejor ajuste de y sobre x; la dispersión sobre esta línea define el estrés de NMDS.	18
Figura 6. Dendrograma que refleja el agrupamiento de las muestras con un coeficiente de aglomeración de 0.91 y el cual se encuentra dividido en las 7 petrofacies recomendadas por el Gráfico estadístico de Humbert	19
Figura 7. Gráfico estadístico de Humbert para determinar el mejor número de conglomerados en el conjunto de datos simulado.	20
Figura 8. Representación de las 7 petrofacies en el diagrama EMD.NM.	21
Figura 9. Petrofacies cuantitativas ubicadas espacialmente en las secciones estratigráficas del Miembro Superior.	23
Figura 10. Petrofacies cuantitativas ubicadas espacialmente en las secciones estratigráficas del Miembro Inferior.	24
Figura 11. Petrofacies identificadas en el diagrama de Dickinson.	26

Lista de tablas

Tabla 1. Ubicación geográfica de puntos de levantamiento de columnas estratigráficas en las que se realizaron los muestreos recopilados.	13
Tabla 2. Valores numéricos asignados a las diferentes variables usadas en la matriz.....	14
Tabla 3. Resumen de cantidad de muestras por petrofacies y su respectivo porcentaje del total de las muestras.	21
Tabla 4. Predominancia de las variables en cada una de las petrofacies.	22

Resumen

La determinación de petrofacies cuantitativas en estudios geológicos es un mecanismo de gran utilidad para identificar la composición de área fuente y mecanismos de acumulación de una cuenca, lo que permite a su vez proponer hipótesis sobre cuerpos geológicos que fueron encargados de aportar el material a la cuenca; estas, a diferencia de las petrofacies tradicionalmente identificadas a través de diagramas ternarios, permiten usar bases de datos con más variables para dicha identificación (e.g. tamaño de grano, selección). El presente proyecto integra una recopilación de 151 conteos petrográficos pertenecientes a la Formación Amagá, los cuales debido a su disimilaridad permiten identificar 7 petrofacies cuantitativas a partir de un estudio multivariado en el que se incluye análisis de clúster y escalado multidimensional no métrico (EMD-NM), cada uno de estos métodos con el uso de la distancia Euclidiana debido a la correlación lineal entre las variables. Con base en lo anterior, se discute la posible afinidad de dichas petrofacies con cuerpos geológicos adyacentes a la cuenca, en términos de su señal de procedencia.

Palabras claves: petrofacies, clúster, Formación Amagá, cuenca.

1. Introducción

La Formación Amagá, de edad Oligoceno-Mioceno, se encuentra ubicada al noroeste de Colombia entre la Cordillera Central y Occidental. Esta formación es definida como una sucesión siliciclástica depositada a lo largo de varias cuencas intramontanas (Lara et al., 2018); definiendo una inconformidad estratigráfica con el basamento metamórfico Paleozoico de la Cordillera Central y sobre su tope se encuentran discordantemente, o en relación, para-conforme las formaciones Miocénicas Combia (Ramírez et al., 2006) e Irra (Toro et al., 1999), definidas como sucesiones volcanoclásticas del Cenozoico tardío (Guzmán y Sierra, 1984).

En múltiples estudios (Mesa, 2012; Páez, 2013; Silva-Tamayo et al., 2008) se han definido una serie de petrofacies para la Formación Amagá, término que hace referencia a un conjunto de rocas que presentan una petrografía similar (Dickinson y Rich, 1972). La definición de petrofacies es de gran importancia ya que permiten identificar la composición de las áreas fuentes y mecanismos de acumulación de una cuenca (Marulanda y Sánchez, 2013). Según Johnsson (1993), las petrofacies de una secuencia estratigráfica representan diferentes factores que influyen en la composición de los sedimentos, además de permitir la inferencia de zonas de aporte sedimentario.

El método aplicado comúnmente para la determinación de petrofacies es cualitativo, en el cual se emplea la clasificación de diagramas ternarios como el propuesto por Folk (1954). Este diagrama toma en cuenta únicamente la composición mineralógica de cuarzo, feldespato, líticos y el porcentaje de matriz. Esta metodología ha sido ampliamente utilizada en estudios previos de la Formación Amagá (e.g. Lara et al., 2018; Páez, 2013). Adicionalmente, existen herramientas dentro del análisis multivariado de datos que permiten tener en cuenta bases de datos con más variables para la identificación de petrofacies de forma cuantitativa (e.g. Al-Baldawi, 2015; Fernandes, 2020; Gómez, 2018). Un ejemplo de estas herramientas es el análisis clúster que tiene como objetivo agrupar una colección de objetos físicos o abstractos en varias clases compuestas por objetos similares (Jing et al., 2021). De igual manera, el escalamiento multidimensional no métrico (EMD-NM) permite tanto preservar la disimilaridad entre los objetos, como también representar las relaciones de ordenamiento entre éstos en un número pequeño y específicos de ejes (Borcard et al., 2018).

En Colombia, la metodología para determinar petrofacies de forma cualitativa ha sido ampliamente utilizada, no obstante, no existen precedentes de análisis multivariado para la determinación de petrofacies en el ámbito geológico. En consecuencia, este trabajo pretende resolver la posibilidad de determinar petrofacies cuantitativas a partir de un análisis multivariado de muestras de rocas sedimentarias para la Formación de Amagá, mediante la integración de rasgos petrográficos de 151 muestras de rocas sedimentarias tomadas de diferentes estudios previos (Lara et al., 2018; Moreno, 2011; Páez, 2013; Silva-Tamayo et al., 2008). Esto con el objetivo de contribuir al entendimiento de la historia de acumulación de la cuenca, tanto para su Miembro Inferior como Superior, ya que la mayoría de los estudios realizados en esta formación son dedicados únicamente al Miembro Inferior por su posible interés económico asociado con el carbón (Páez, 2013).

2. Antecedentes

El primer estudio geológico llevado a cabo en la Formación Amagá fue realizado por Grosse (1926), quien la denominó como el Terciario Carbonífero de Colombia. Posteriormente, González (1980) la llamó Formación Amagá dividiéndola en 3 miembros: Superior, Medio e Inferior. Sin embargo, existen otros autores como Sierra & MacDonald (2001) y Silva Tamayo et al., (2008) que definen únicamente dos miembros llamados Inferior y Superior. Por su parte, Guzmán & Sierra (1984) fueron los primeros en realizar estudios estratigráficos de esta unidad, la cual subdividieron el Miembro Inferior en cuatro zonas cada una con un ambiente de acumulación específico.

Con respecto a la identificación de petrofacies cualitativas, en la Formación Amagá se han realizado diferentes trabajos, entre los que se encuentran Silva Tamayo et al., (2008) quienes propusieron tres petrofacies a lo largo del Miembro Inferior y Superior. Por otra parte, se han desarrollado proyectos de grado donde se definieron petrofacies para la Formación Amagá entre los municipios de La Pintada y Santa Bárbara (cuatro petrofacies; Mesa, 2012)). Por su parte Páez (2013) en los sectores de La Pintada y Valparaíso (suroccidente del departamento de Antioquia), identificó y describió un total de 3 petrofacies presentes en el Miembro Superior de la Formación Amagá. Estos y otros trabajos han utilizado el método cualitativo de Folk (1954).

3. Localización

La zona de estudio se encuentra ubicada entre la Cordillera Central y Occidental de los Andes Colombianos, hacia el suroeste del departamento de Antioquia. Entre los municipios que abarca esta zona se encuentran de norte a sur: Santa Fe de Antioquia, Titiribí, Amagá, Venecia, Fredonia, Santa Bárbara, La Pintada y Valparaíso. La zona de estudio comprende la Formación Amagá, en la cual estudios anteriores de donde proviene la información utilizada en este trabajo, han levantado columnas estratigráficas, donde se han tomado diferentes muestras de areniscas para análisis petrográficos (**Fig. 1**).

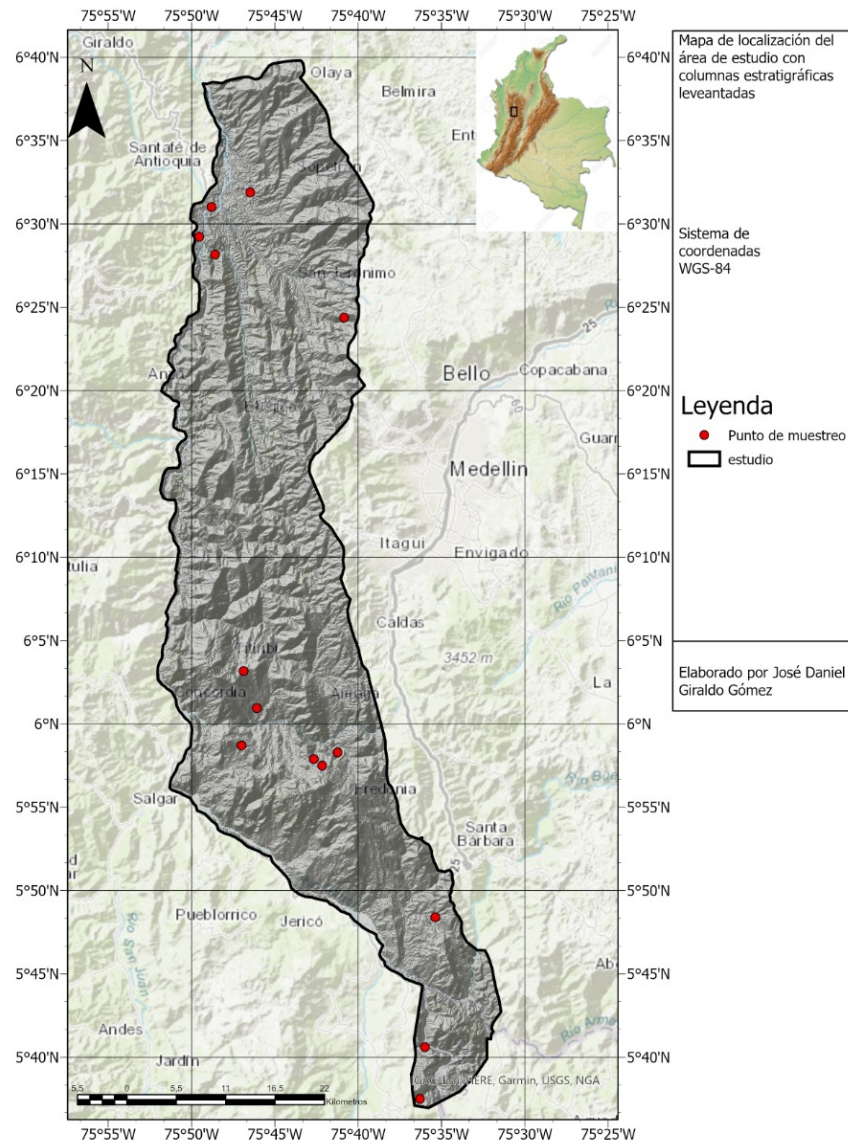


Figura 1. Mapa de localización de las columnas estratigráficas y muestras de rocas sedimentarias en la Formación Amagá.

4. Hipótesis

La disimilaridad de los conteos petrográficos a lo largo de la sucesión sedimentaria de la Formación Amagá permite identificar tres petrofacies cuantitativas.

5. Objetivos

5.1. General

Determinar cuantitativamente las petrofacies sedimentarias de la Formación Amagá a partir de un análisis de datos multivariado de 151 muestras de rocas sedimentarias.

5.2. Específicos

- Recopilar a través de una matriz todos los datos petrográficos y estratigráficos de la Formación Amagá disponibles en la literatura.
- Realizar una prueba de Pearson a todos los datos petrográficos para determinar la correlación lineal o no lineal entre ellos.
- Determinar discrepancia entre los valores observados y los valores esperados bajo un modelo estadístico.
- Graficar las secciones estratigráficas de donde se extrajeron los datos petrográficos en un mismo formato.
- Comparar las petrofacies cuantitativas con las petrofacies propuestas en la literatura.

6. Geología Regional

Los Andes del Norte ubicados al noroeste de Sur América, específicamente en Colombia, están constituidos por tres cadenas montañosas conocidas como Cordillera Occidental, Central y Oriental; cada una de ellas refleja una porción de la evolución tectónica de los Andes del Norte, la cual ha estado marcada por diferentes eventos magmáticos en el Precámbrico, Triásico-Jurásico a Cretácico Superior y desde el Paleógeno y Neógeno tardío hasta la actualidad (Aspen et al., 1987). Según múltiples autores, algunos de los eventos magmáticos han sido asociados a la subducción de la placa Nazca/Farallón bajo el margen occidental de la placa suramericana (Cediel et al., 2003; McCourt et al., 1984; Rodríguez et al., 2012). Durante el Cretácico la placa Caribe inició su migración hacia el este hasta su posición actual, generando así la reactivación de fallas del Mesozoico temprano e incluso más antiguas, exhumación de rocas e importantes deformaciones

en los Andes del Norte (Case et al., 1971; Villagómez y Spikings, 2013). Este evento permitió la acreción de un conjunto de terrenos y arcos magmáticos de afinidad oceánica del Cretácico Tardío que conforman a la Cordillera Occidental y se encuentran continuos a la Cordillera Central a lo largo de una sutura que alberga rocas volcánico-sedimentarias e intrusivas altamente cizalladas (Bustamante et al., 2017).

Hacia el noroeste de los Andes colombianos, entre la Cordillera Occidental y Central se ubica la Formación Amagá, depositada a lo largo de una serie de cuencas clasificadas tectónicamente como pull-apart con tendencia sur-norte que siguen la dirección del sistema de fallas Cauca Romeral (Sierra et al., 2003). De esta manera, las fallas de rumbo con carácter dextral son responsables del desarrollo de la cuenca de Amagá, la cual forma parte de la cuenca de mayor dimensión Amagá-Cauca-Patía (Cediel et al., 2003; Sierra et al., 2003). La Formación Amagá se superpone discordantemente, y, en sectores, se encuentra en contacto fallado con el basamento ígneo-metamórfico Triásico a Jurásico de la Cordillera Central y Occidental (Silva-Tamayo et al., 2008) (**Fig. 2**).

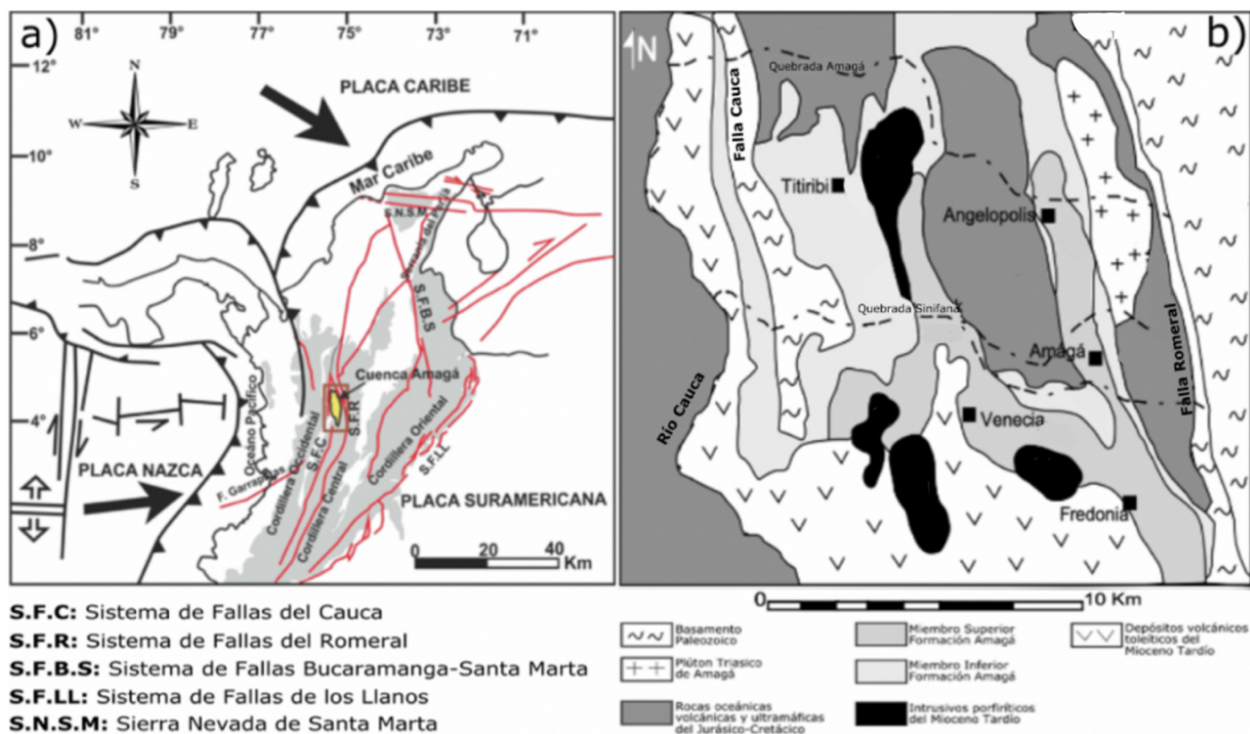


Figura 2. a) Mapa tectonoestratigráfico de los Andes. El polígono amarillo representa la Formación Amagá. b) Mapa geológico del área de estudio donde se observan ambos miembros de la Formación Amagá y demás formaciones adyacentes. Tomado y editado de Páez (2013) y Silva et al., (2008) respectivamente.

Según Grosse (1926) el Miembro Inferior de esta formación tiene una edad de acumulación del Eoceno al Oligoceno y se caracteriza por la presencia de areniscas de grano medio, que varían de moderadamente clasificadas a bien clasificadas ricas en cuarzo, con presencia de feldespato potásico, plagioclasa, fragmentos de rocas metamórficas y plutónicas, además de carbón bituminoso (Bandon et al., 2008; Silva-Tamayo et al., 2008). La acumulación de este miembro se dio en un ambiente fluvial continental de sistemas fluviales trenzados con presencia de areniscas de grano grueso y conglomerados hacia la base de las secciones (Sierra et al., 2003; Silva-Tamayo et al., 2008). Por su parte, las sucesiones de grano fino compuestas por sub-litoarenitas bien clasificadas con alto contenido de cuarzo, limolitas masivas y capas de carbón se asocian a la acumulación en ambientes de ríos meándricos (Sierra y Marín, 2012; Silva-Tamayo et al., 2008).

El Miembro Inferior está separado del Miembro Superior de edad Oligoceno-Mioceno por una discordancia y el cambio composicional en las litoarenitas, la cuales presentan clastos sedimentarios y metamórficos provenientes de la Cordillera Central (Páez, 2013). Adicionalmente, el ambiente de acumulación de este miembro se asocia a ambientes fluviales trenzados con presencia de areniscas compuestas por cuarzo, feldespato potásico, plagioclasa y fragmentos líticos de rocas metamórficas y plutónicas (Silva-Tamayo et al., 2008), además de sucesiones de lito-grauvacas, litoarenitas feldespáticas y lodolitas (Sierra y Marín, 2012). El Miembro Inferior y Superior se encuentran separados por una discordancia y un cambio composicional hacia el miembro más reciente donde es posible encontrar lito-arenita con fragmentos de rocas sedimentarias y metamórficas (Páez, 2013).

Por otra parte, la Formación Amagá subyace de forma discordante a para-conforme los depósitos volcánico-clásticos de la Formación Combia, originada como resultado de la subducción de la placa Nazca bajo la placa de América del Sur durante el Mioceno medio a tardío (Cediell et al., 2003; Grosse, 1926; Leal-Mejía et al., 2011). Finalmente, hacia el tope se encuentra discordantemente la Formación Santa Fe de Antioquia, constituida por una serie de sedimentos siliciclásticos consolidados poco litificados asociados a facies típicas de ríos trenzados (Lara et al., 2018).

7. Metodología

7.1. Datos

La base de datos estudiada consta de 151 conteos petrográficos pertenecientes a la Formación Amagá obtenidos a partir de los estudios de: Silva et al. (2008); Moreno (2011); Páez (2013) y Lara et al. (2018). La localización geográfica de cada sección donde fueron obtenidas las muestras se encuentra en la **Tabla 1**.

Nombre Sección	Miembro Amagá	Latitud	Longitud	Autor y año
Cinco-Venecia	Superior	6.0529	-75.7813	(Silva-Tamayo et al., 2008)
Palomos	Inferior	5.9581	-75.7027	
Sinifaná	Inferior	5.9716	-75.6874	
Venecia-1	Superior-Inferior	5.9783	-75.7834	(Moreno, 2011)
Cinco 1b	Superior	5.9588	-75.7055	
Palmichala	Superior	5.6249	-75.6049	(Páez, 2013)
Sabaletas	Superior	5.6766	-75.6000	
Sabaletica	Superior	5.8068	-75.5894	
Guadacú	Superior	6.4063	-75.6808	(Lara et al., 2018)
La Puerta	Superior	6.4698	-75.8100	
Nuarque	Superior	6.5320	-75.7744	
La Seca	Inferior	6.4871	-75.8256	
El Puente	Inferior	6.5174	-75.8131	

Tabla 1. Ubicación geográfica de puntos de levantamiento de columnas estratigráficas en las que se realizaron los muestreos recopilados.

7.2. Procesamiento de datos

7.2.1. Procedencia

Con base en los conteos mencionados anteriormente y mediante el código 'provenanceplot' (Borcard et al., 2018) se determinó la procedencia de cada una de las muestras, cabe destacar que este código emplea la clasificación propuesta por Dickinson (1985).

7.2.2. Columnas estratigráficas

Las columnas estratigráficas fueron graficadas a escala 1:500 mediante la librería SDAR (Ortiz y Jaramillo, 2020).

7.2.3. Análisis multivariado de datos petrográficos

En esta fase es necesario que todas las variables sean cuantitativas; de este modo, se asignaron categorías numéricas al tamaño de grano, selección y procedencia (**Tabla 2**).

Valores	Tamaño de grano	Selección	Procedencia
1	Muy fino	Pobre	Arco magmático
2	Fino	Media	Orógeno reciclado
3	Medio	Buena	Bloque continental
4	Grueso	NA	NA
5	Muy grueso	NA	NA

Tabla 2. Valores numéricos asignados a las diferentes variables usadas en la matriz.

7.2.3.1. Escalado multidimensional no métrico (EMD-NM)

Consiste en una técnica multivariada de interdependencia que trata de representar en un espacio geométrico de dos o mas dimensiones las proximidades existentes entre un conjunto de objetos o de estímulos (Maydeu y García, 2010). Este análisis se ejecutó empleando el paquete Vegan en su versión 2.5-7 el cual exige seleccionar una distancia o medida de similitud, por lo que se determinó la correlación entre las variables a partir de un estudio de coeficiente de Pearson. En caso de existir una correlación lineal lo recomendado es usar la distancia Euclidean, y si, por el contrario, existe una correlación modal (no lineal) la recomendación es usar el método de distancia Ward (Hammer y Harper, 2006).

Una forma útil de evaluar la idoneidad de un resultado de EMD-NM es comparar en un diagrama de Shepard las diferencias entre los objetos de la gráfica de ordenación con las diferencias originales (Borcard et al., 2018). Por este motivo, los datos fueron ploteados en dicho diagrama, además de realizar la prueba de bondad de ajuste (en inglés goodness of fit) que permitió

resumir la discrepancia entre los valores observados y los valores esperados bajo un modelo estadístico (Maydeu y García, 2010).

7.2.3.2. Análisis clúster (o conglomerados)

El objetivo de esta herramienta es descubrir subconjuntos discontinuos en un entorno que a veces es discreto, esto, asumiendo solo un modelo estadístico de distribución sin conocer la naturaleza de los datos (Borcard et al., 2018; Fernandes, 2020). Por tanto, el análisis de conglomerados es más un método de exploración y visualización de datos que una técnica estadística formal (Hammer y Harper, 2006). En el caso de este proyecto, dicha herramienta permitió agrupar muestras con cierto grado de similitud, para de esta manera definir distintas petrofacies a lo largo de la Formación Amagá.

Cabe destacar, que el análisis clúster puede ser ejecutado a partir de algoritmos jerárquicos o basados en particiones. En este estudio se usará el algoritmo Agne, el cual, en primer lugar, asigna un clúster a cada muestra y a partir de esto va uniendo los clústeres en función de la similitud entre ellos, obteniendo así un único clúster (Sánchez, 2018). Al igual que en el EMD-NM, se empleó el paquete Vegan para realizar el análisis necesario, el cual tiene las funciones más básicas de análisis de diversidad, ordenación comunitaria y análisis de disimilitud (Oksanen et al., 2020).

7.3. Interpretación de resultados

Por ultimo, con base en los resultados obtenidos mediante el procesamiento de datos y la definición de petrofacies cuantitativas de la Formación Amagá, se hizo la descripción geológica y comparación de dichas petrofacies con las propuestas en los diferentes trabajos recopilados.

8. Resultados

Los conteos petrográficos fueron graficados en el diagrama de (Dickinson, 1985) (**Fig. 3**) para determinar la procedencia geológica de las muestras, esto con la finalidad de seleccionar dicha característica como una variable más en la matriz final de datos (**Anexo 1**). En este diagrama se observan 140 muestras concentradas hacia el campo de orógeno reciclado, mientras en las zonas de arco magmático y bloque continental no se presenta alto volumen de datos (3.3% y 4% respectivamente).

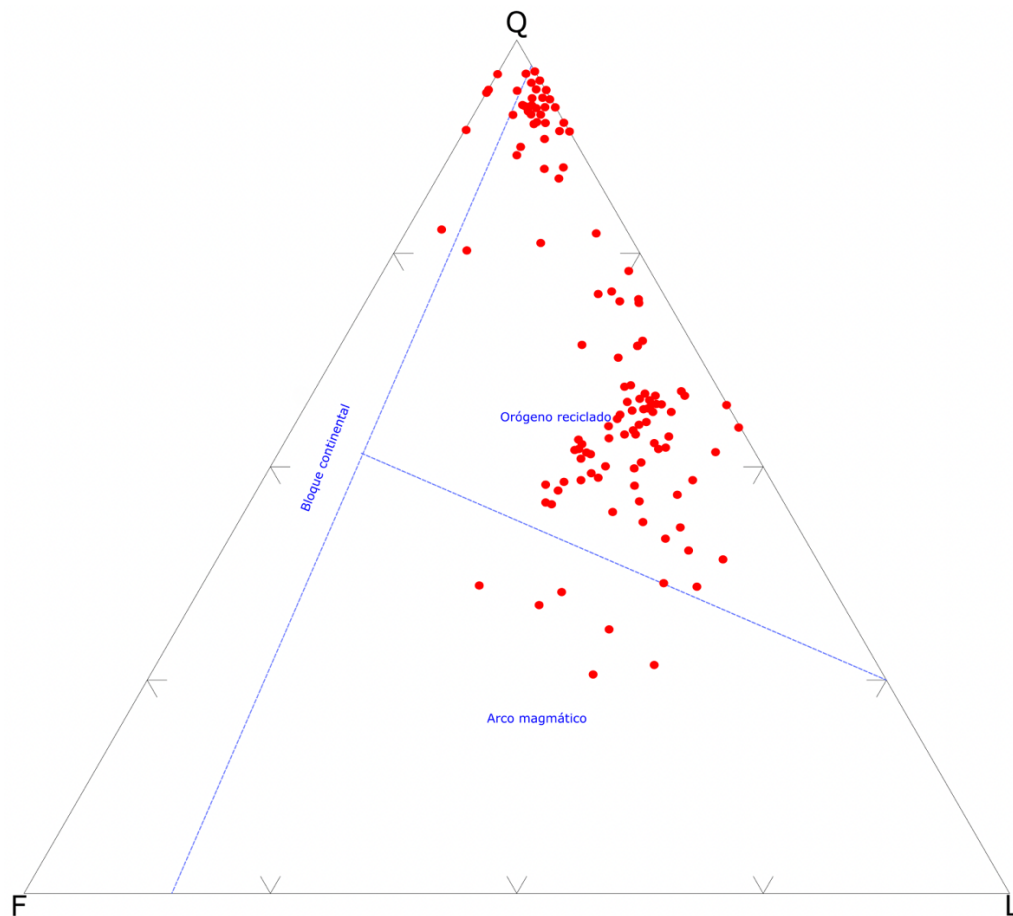


Figura 3. Diagrama de Dickinson (1985) donde se observa que las muestras presentan una concentración principalmente en el campo de orógeno reciclado.

El primer procesamiento estadístico de los datos demostró el tipo de correlación existente entre las variables, representado por los valores de coeficiente de Pearson (**Anexo 2**) y P-value (**Anexo 3**).

En los coeficientes de Pearson es posible observar que más del 90% de las variables presentan correlaciones positivas y negativas significativas, la primera de estas indica que existe diversificación entre las variables, es decir, que cuando una de estas aumenta la otra disminuye y viceversa (comportamiento inversamente proporcional): las correlaciones positivas por su parte indican que cuando una variable aumenta o disminuye la otra también lo hace de la misma manera, es decir en este caso el comportamiento es directamente proporcional.

En el caso de los valores de P-value, se observa que más de 88% son > 0.05 , estos indican que es posible rechazar la hipótesis nula (H_0), que en este caso es definida como: “las variables no son correlacionales”; por lo tanto, al ser la mayoría variables correlacionales linealmente y con valores de P-value superiores a 0.05 se usó la distancia euclidiana para análisis futuros.

Posteriormente, en el análisis de escalado multidimensional no métrico se obtuvo el diagrama de dispersión y nivel de estrés entre las variables (diagrama EMD-NM) (**Fig. 4**) dando como resultado un valor de 0.091 el cual según Clarke (1993) indica una buena ordenación. A partir de este análisis se obtuvo el diagrama de Shepard o gráfico de ajuste lineal (**Fig. 5**) donde se observa poca dispersión a lo largo de distancias bajas y medias y dispersión moderada en distancias altas lo que indica un resultado fiable para el análisis de estos datos, además la línea continua presente en este diagrama denota la mejor estimación de la relación entre la distancia original y la final.

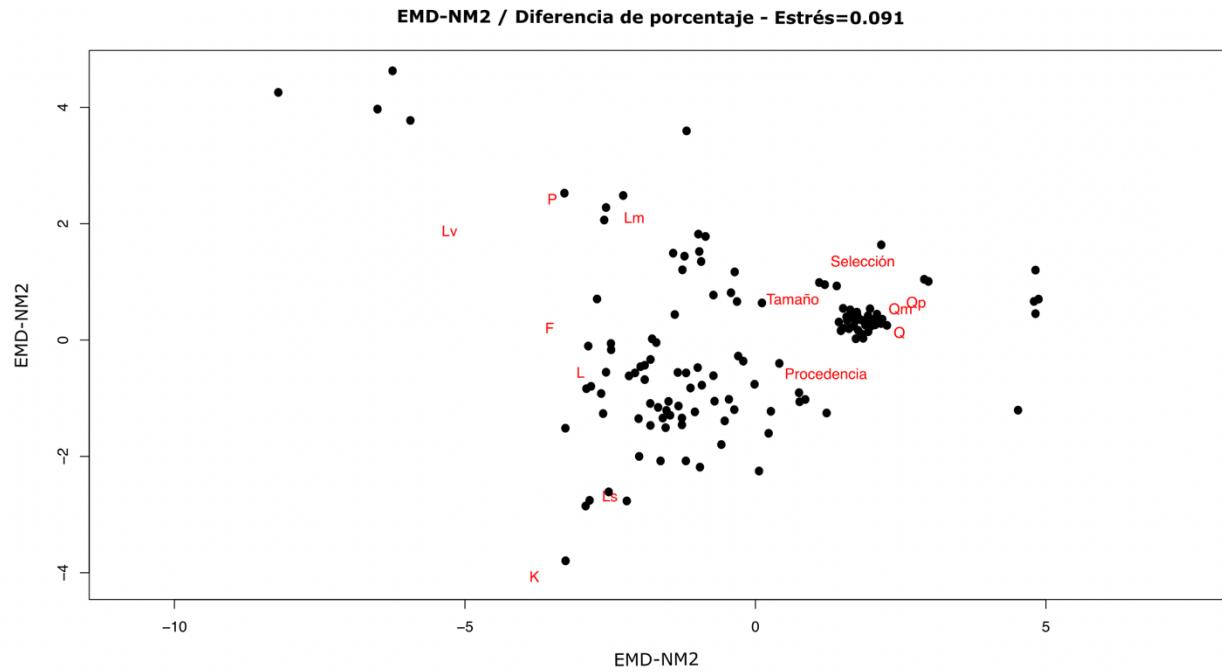


Figura 4. Diagrama de dispersión y nivel de estrés entre las muestras de la Formación Amagá (0.091).

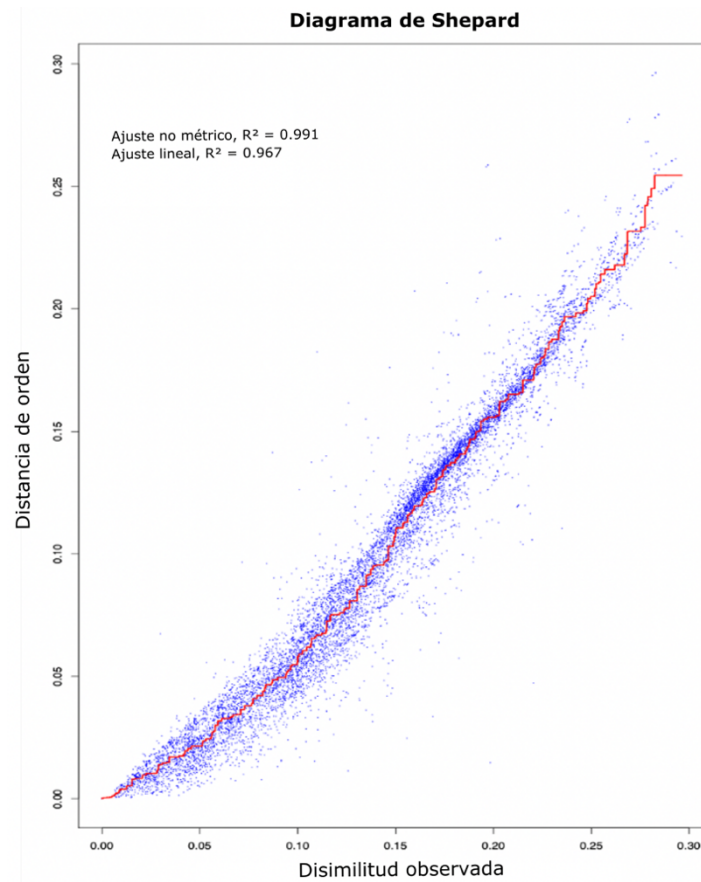


Figura 5. Diagrama de Shepard, la línea denota la regresión monótona (creciente) de mejor ajuste de y sobre x; la dispersión sobre esta línea define el estrés de NMDS.

El dendrograma es el último diagrama obtenido (**Fig. 6**), éste presenta como resultado un coeficiente de aglomeración de 0.91 el cual según Boehmke & Greenwell (2019) describe la fuerza de la estructura de agrupación donde los valores más cercanos a 1 sugieren una estructura de agrupación más equilibrada, sin embargo, a partir de este diagrama no es posible determinar el número de conglomerados adecuados para el conjunto de datos simulados, por tal motivo se obtuvo el gráfico estadístico de Humbert (**Fig. 7**) definido como método gráfico para determinar el número de agrupaciones adecuadas en el cual se busca una “rodilla” que corresponde a un aumento significativo del valor de la medida (Charrad et al., 2014). En dicho grafico se observa que el número de clústeres adecuados para el estudio es 7.

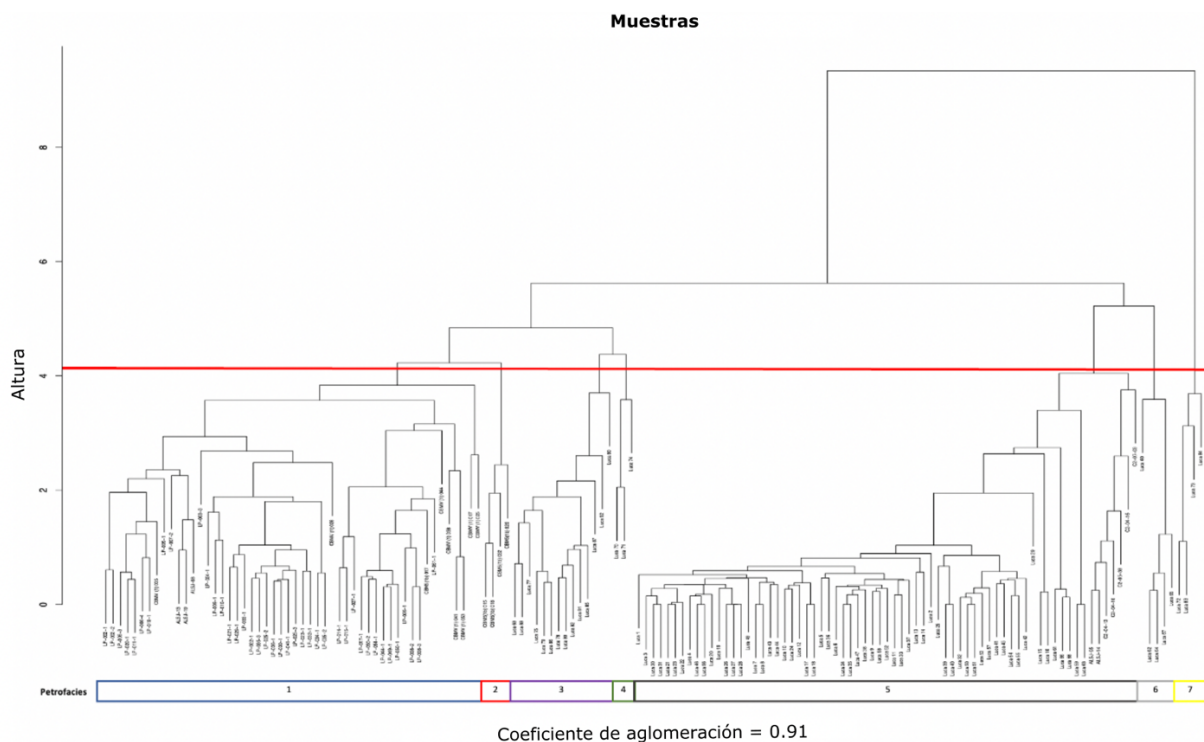


Figura 6. Dendrograma que refleja el agrupamiento de las muestras con un coeficiente de aglomeración de 0.91 y el cual se encuentra dividido en las 7 petrofacies recomendadas por el Gráfico estadístico de Humbert

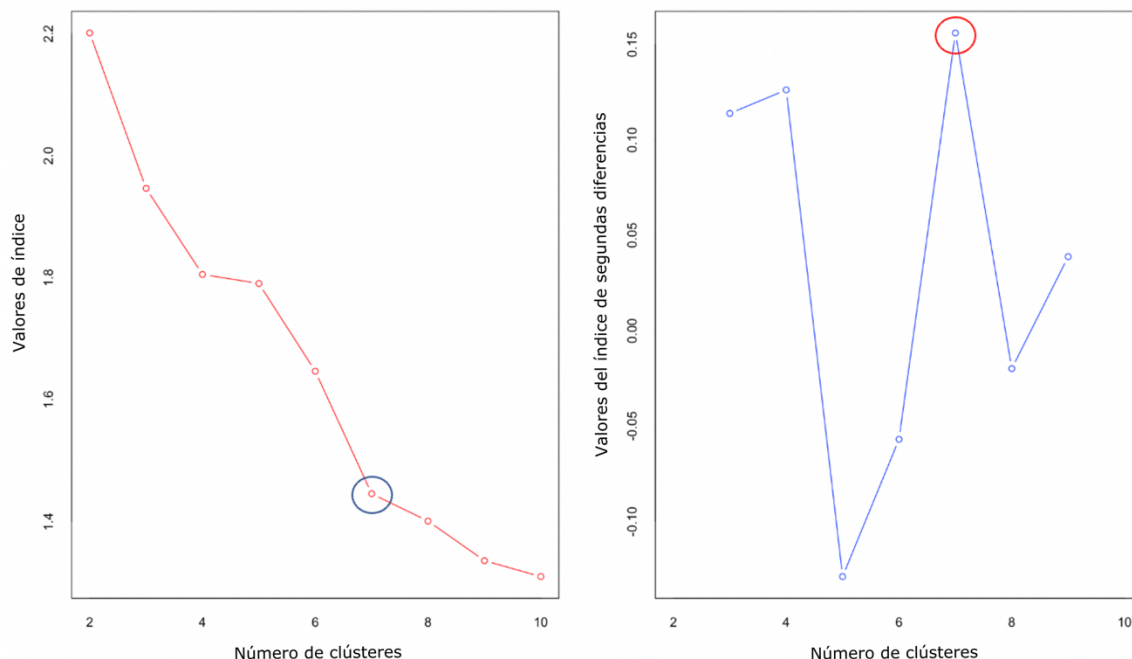


Figura 7. Gráfico estadístico de Humbert para determinar el mejor número de conglomerados en el conjunto de datos simulado.

Con la finalidad de tomar en cuenta el resultado anterior se realizó un corte en el eje Y en el dendrograma (**Fig. 6 y Anexo 4**), dicho corte permite obtener 7 agrupaciones de datos (en este caso petrofacies), la primera de ellas de izquierda a derecha representada con un recuadro de color azul contiene un total de 52 muestras equivalente al 34.44% de las muestras totales, la segunda petrofacies cuantitativa se encuentra delimitada con color rojo, esta a diferencia de la anterior concentra menos muestras, representando únicamente un 2.65% del total de datos; continua a esta se ubica la tercera petrofacie, representada con color morado, agrupa un total de 14 muestras equivalentes a un 9.27% de las muestras totales; posteriormente, se encuentra la petrofacies 4 con solamente tres muestras, siendo esta la agrupación con menor densidad de datos; la siguiente petrofacies identificada con un recuadro de color negro almacena la mayor cantidad de muestras con un total de 69, representando así un 45.70% de la base de datos. Por último, se encuentran las petrofacies 6 y 7 cada una agrupando cinco y cuatro muestras respectivamente, completando así un 5.95% de las muestras totales. En **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se presenta la información descrita anteriormente de forma resumida.

Por último, en la **Fig. 8 y Anexo 5** se observan las agrupaciones de cada una de las petrofacies y, dependiendo de la proximidad a las diferentes variables, la correlación directa a estas.

Petrofacies	Cantidad de muestras	% total de muestras
1	52	34.44%
2	4	2.65%
3	14	9.27%
4	3	1.98%
5	69	45.70%
6	5	3.31%
7	4	2.65%
TOTAL	151	100%

Tabla 3. Resumen de cantidad de muestras por petrofacies y su respectivo porcentaje del total de las muestras.

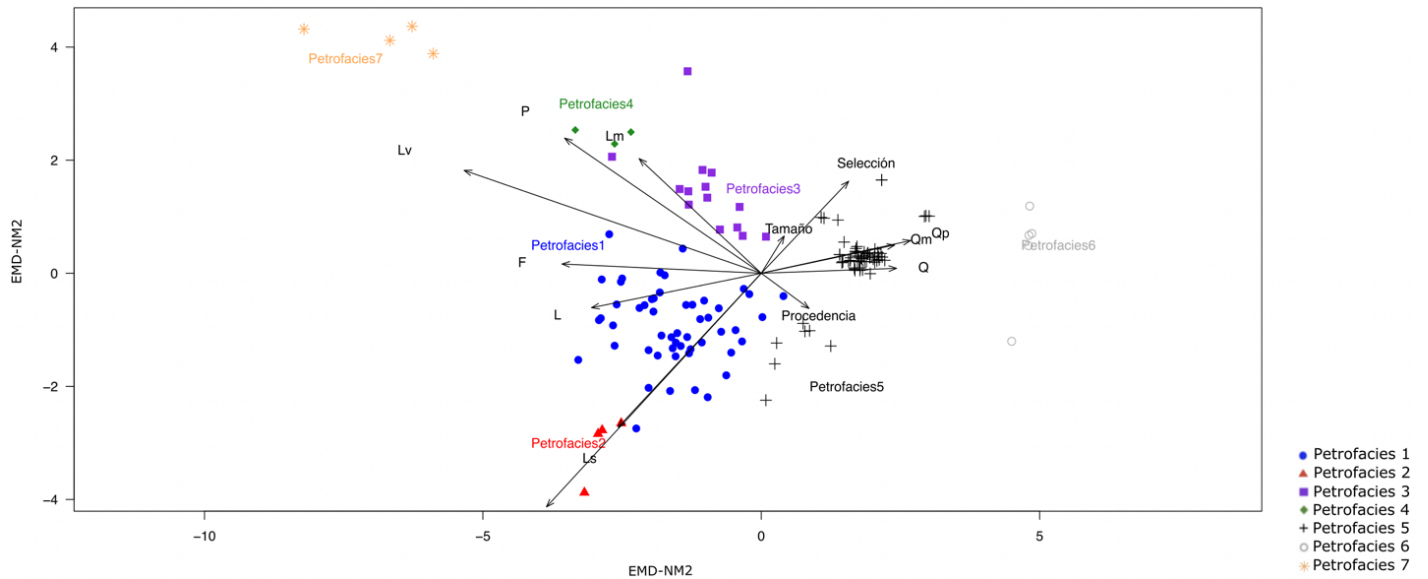


Figura 8. Representación de las 7 petrofacies en el diagrama EMD.NM.

La predominancia de las variables en cada una de las petrofacies (Tabla 4) muestra una tendencia clara en la que el cuarzo total y cuarzo monocristalino son las variables que más predominan, excepto en la petrofacies 7 que se encuentra predominada por los líticos. Además de esto se observa que en cada una de las petrofacies las variables como el Feldespato (K), tamaño (T), procedencia y selección poseen muy bajo porcentaje de predominio.

Petrofacies 1	Q	L	Qm	Ls	Qp	F	Lv	P	K	Lm	Tamaño	Procedencia	Selección
	0.27	0.17	0.16	0.10	0.10	0.06	0.04	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01
Petrofacies 2	Q	Qm	L	Ls	F	K	Lm	Tamaño	Procedencia	Lv	P	Selección	Qp
	0.23	0.20	0.20	0.16	0.08	0.07	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00
Petrofacies 3	Q	Qm	L	Qp	Lm	Ls	F	P	Lv	Tamaño	Selección	Procedencia	K
	0.27	0.22	0.15	0.08	0.07	0.06	0.04	0.04	0.03	0.02	0.01	0.01	0.00
Petrofacies 4	Q	Qm	L	Lv	F	P	Qp	Lm	Ls	Tamaño	Selección	Procedencia	K
	0.22	0.18	0.17	0.10	0.08	0.08	0.07	0.05	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00
Petrofacies 5	Q	Qm	Qp	L	Tamaño	Ls	Lm	F	Procedencia	Selección	P	K	Lv
	0.37	0.30	0.23	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00
Petrofacies 6	Q	Qm	Qp	F	P	Selección	Procedencia	Tamaño	L	K	Lv	Ls	Lm
	0.34	0.30	0.28	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Petrofacies 7	L	Q	F	Qm	P	Lv	Lm	Qp	Ls	Tamaño	K	Selección	Procedencia
	0.19	0.15	0.13	0.13	0.12	0.11	0.06	0.06	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00

Tabla 4. Predominancia de las variables en cada una de las petrofacies.

En **Fig. 9** se puede observar cómo es la distribución de las siete petrofacies en las distintas secciones estratigráficas donde el Miembro Superior se encuentra representado en su mayoría por las petrofacies 1 y 5 y en menor medida por las petrofacies 3, 4 y 7; mientras que el Miembro Inferior se encuentra predominado por las petrofacies 5 y 6 (**Fig. 10**).

MIEMBRO SUPERIOR

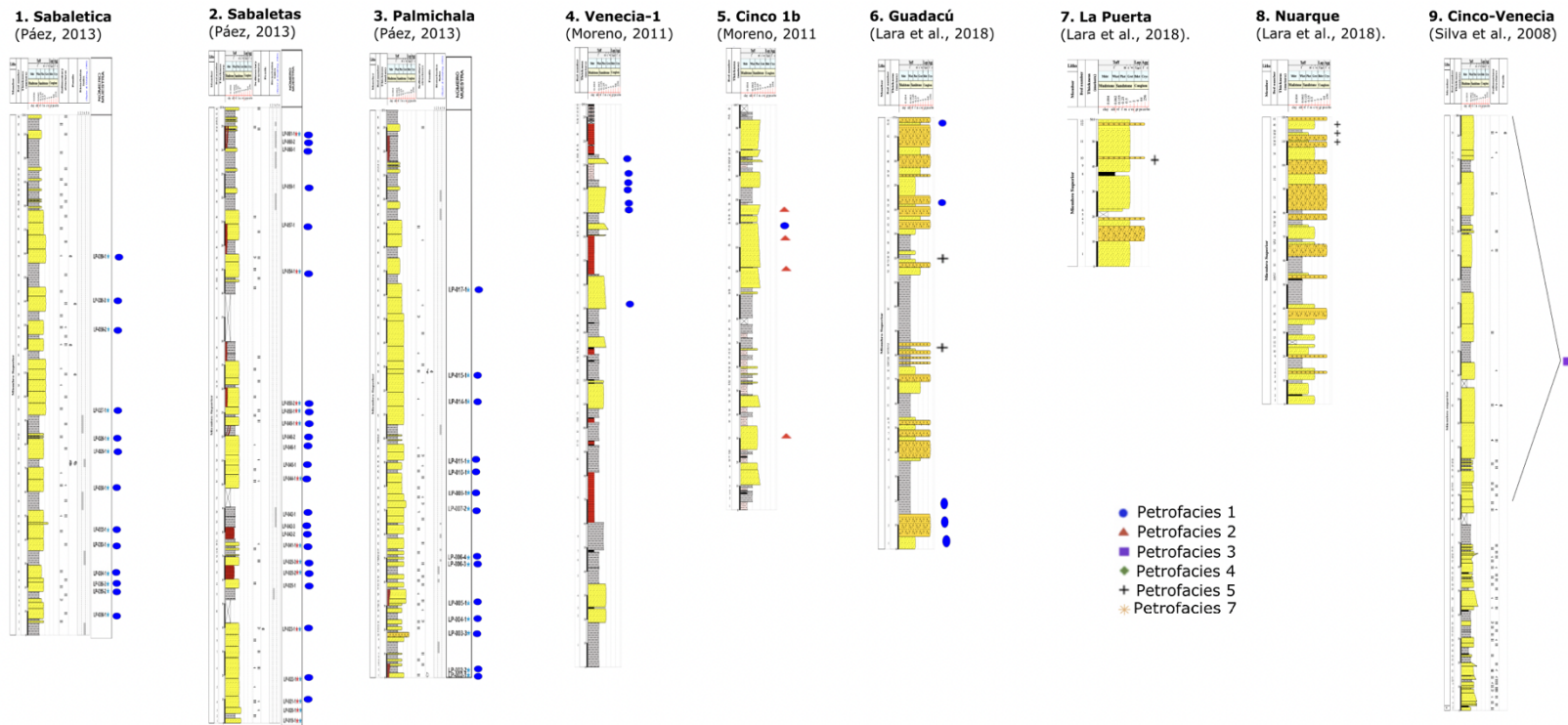
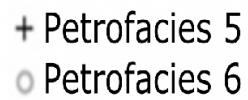


Figura 9. Petrofacies cuantitativas ubicadas espacialmente en las secciones estratigráficas del Miembro Superior.

10. La Seca

(Lara et al., 2018).



11. Sinifana



12. Palomos

(Silva et al., 2008)



UNIVERSIDAD EAFIT

9. Discusión

A lo largo de las secciones estratigráficas Sabaletas, Sabaletica, Palmichala, Pozo Venecia-1, Cinco (1b) y Guadacú, Páez (2013), Moreno (2011) y Lara et al., (2018) describen tres petrofacies. Sin embargo, los resultados obtenidos aquí sugieren que esta sucesión corresponde a la petrofacies 1. Esta se encuentra dominada por cuarzo monocristalino (16%) indicando así que el material podría proceder del Batolito Antioqueño y el Stock de Amagá (Páez, 2013). Restrepo-Moreno et al., (2009) a través de estudios con Apatito (U-Th)/He concluyen que durante el Eoceno y Oligoceno se produjeron dos pulsos de exhumación del Batolito Antioqueño. Por otra parte, los líticos sedimentarios y cuarzo policristalino, que se encuentran en igual proporción en la petrofacies 1 (10%), permiten inferir un retrabajamiento del Miembro Inferior ya que según Piedrahita (2017) ambos miembros presentan edades muy similares a partir de estudios de traza de circón.

El diagrama de Dickinson (**Fig. 11**) permite asociar esta petrofacies a un ambiente de orógeno reciclado. Según Dickinson (1985) este ambiente puede ocurrir en varios entornos tectónicos donde el material sedimentario se deforma, levanta y erosiona, entre ellos se encuentran los complejos de subducción, backarc thrustbelts y cinturones de sutura. Es necesario mencionar que la única fuente que no se correlaciona con un orógeno reciclado es el Batolito Antioqueño, sin embargo, esto ocurre ya que al momento de graficar en el diagrama de Dickinson no es posible detallar si el cuarzo es monocristalino o policristalino; en consecuencia, a pesar de que esta petrofacies se encuentra dominada por cuarzo monocristalino, el método de clasificación no diferencia ambos tipos de cuarzo.

El hecho de que estas sucesiones estén dominadas por una sola petrofacies, quizá ocurra debido a que la escala de este trabajo es regional y no local (i.e. Cuenca Amagá). Adicionalmente, una de las muestras de la petrofacies 1 se encuentra ubicada en la parte superior del Pozo Cinco (1b) (**Fig. 9**), lo que permite inferir que dicho pozo puede ser correlacionable con el Pozo Venecia. Esta afirmación se ve respaldada por la ausencia de mantos de Carbón en ambos pozos (Moreno, 2011), por este motivo es posible afirmar además que ambas secciones representan la litología del Miembro Superior de la Formación Amagá.

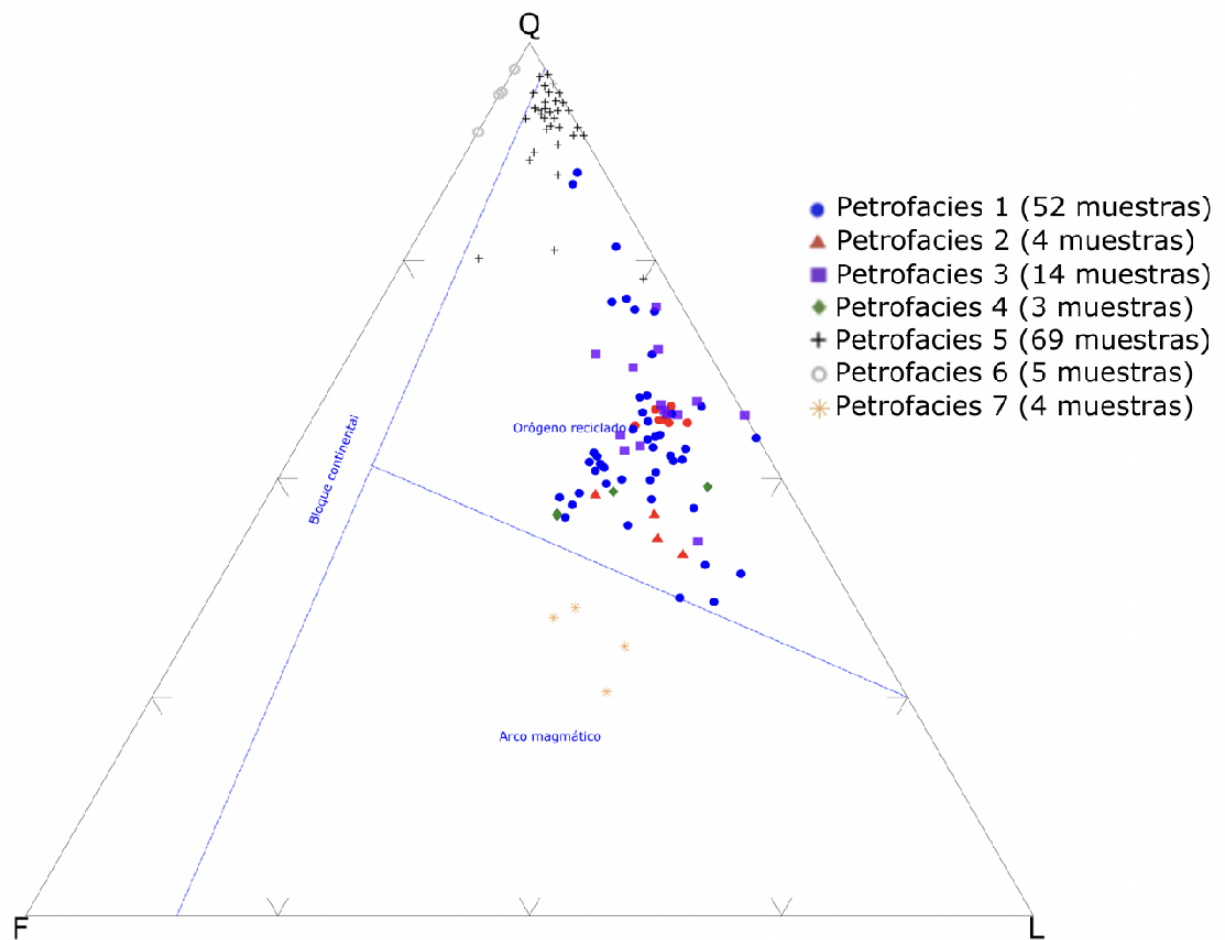


Figura 11. Petrofacies identificadas en el diagrama de Dickinson.

Por otra parte, la petrofacies 2 incluye 4 muestras recolectadas en el Pozo Cinco (1b) por Moreno (2011) quien la describe como wacka lítica a partir del diagrama de Folk (1954). En esta petrofacies se encuentra cuarzo monocristalino (20%), líticos sedimentarios (16%) y poca dominancia del Feldespato (8%). Cabe resaltar que posiblemente la composición de estas muestras haya cambiado con el tiempo y no sea la misma del momento exacto en el que tuvo lugar su acumulación; sin embargo, dichas composiciones actuales reflejan una procedencia asociada a un orógeno reciclado según el diagrama ternario de Dickinson (**Fig. 11**), el cual según Moreno (2011) estaría representado por el Complejo Quebradagrande, el basamento expuesto de la paleocordillera Central (rocas metamórficas); por otra parte, los fragmentos sedimentarios al igual que en la petrofacies anterior podrían estar asociados a un retrabajamiento del Miembro Inferior de la Formación Amagá.

La petrofacies 3 se encuentra dominada al igual que la anterior por cuarzo monocristalino (22%), líticos metamórficos y sedimentarios con similares porcentajes (7% y 6% respectivamente), y muy poco porcentaje de feldespatos (4%). Esta composición señala como fuente principal de los sedimentos rocas metamórficas y en menor medida rocas sedimentarias. Adicionalmente, según la clasificación de Dickinson (**Fig. 11**) las muestras pertenecientes a esta petrofacies se encuentran en el campo de orógeno reciclado, de esta manera, el porcentaje de líticos metamórficos y sedimentarios son asociados al Complejo Arquía y el Complejo Cañas Gordas respectivamente según Silva-Tamayo et al., (2008).

A diferencia del estudio de Silva-Tamayo et al., (2008) donde las muestras de la petrofacies 3 y de la petrofacies 4 son agrupadas en una sola, en este trabajo son divididas en dos; ya que en la petrofacies 4 a diferencia de la 3, los líticos volcánicos (10%) son más abundantes que los sedimentarios y metamórficos, además se presentan proporciones mayores de feldespatos (8%). El contenido de material volcánico podría indicar que esas muestras son de la Formación Combia, la cual presentó actividad de manera incipiente en un intervalo entre el Mioceno-Plioceno (Lara et al., 2018; Moreno, 2011; V. A. Piedrahita et al., 2017). Estas tres muestras se encuentran ubicadas en el campo de orógeno reciclado (**Fig. 11**). Adicionalmente, la génesis de la Formación Combia según Cediel et al., (2003) y Leal-Mejía et al., (2011) se produjo por la subducción de la placa de Nazca por debajo de la placa de América del Sur; es decir, el orógeno reciclado en este caso ocurrió en un entorno de complejo de subducción.

Por otra parte, la petrofacies 5 se encuentra compuesta por muestras de las secciones levantadas por Lara et al., (2018) y Silva-Tamayo (2008), esta petrofacies a diferencia de las anteriores no se concentra únicamente en un solo miembro, la dominancia mineralógica se encuentra representada por cuarzo donde el tipo monocristalino (30%) prevalece sobre el policristalino (23%) y una casi nula dominancia de feldespatos. Respecto a la procedencia de las muestras de esta petrofacies, se observa que se encuentra en el campo de orógeno reciclado (**Fig. 11**); los autores proponen que las muestras pertenecientes al Miembro Inferior presentan una afinidad con el dominio Cañas Gordas, la Cordillera Central y Complejo Quebradagrande, mientras que las muestras ubicadas en el Miembro Superior fueron aportadas por el basamento metamórfico jurásico de la Cordillera Central (Complejo Cajamarca) (Lara et al., 2018; Silva-Tamayo et al., 2008).

En cuanto a la petrofacies 6, se observa que la composición es muy similar a la presentada por la petrofacies 5, donde el cuarzo monocristalino y policristalino con porcentajes de 30% y 28% respectivamente son las variables mas dominantes, sin embargo, la dominancia de líticos en esta petrofacies es nulo y a diferencia de la petrofacies 5 esta petrofacies se encuentra en el campo de bloque continental (**Fig. 11**). Según Dickinson (1985) los altos porcentajes de cuarzo con respecto a los feldespatos y la baja concentración de líticos se pueden dar debido a la meteorización intensa que ocurre en este ambiente. La procedencia del material en esta petrofacies se relaciona al Complejo Quebradagrande (Silva-Tamayo et al., 2008), el cual según Moreno-Sánchez et al., (2007) y Nivia et al., (2006) está asociado con un ambiente magmático y a su vez con un margen activo continental, teniendo así una afinidad volcánica al oeste y continental al este; de esta manera, es posible correlacionar dicho complejo con una procedencia de bloque continental.

Por ultimo, la petrofacies 7 se encuentra dominada por líticos (17%) y porcentajes de cuarzo (15%) y feldespatos (13%) muy similares. Los principales líticos en este caso son volcánicos y según el diagrama de Dickinson el material de esta petrofacies proviene de un arco magmático (**Fig. 11**) lo que concuerda con la hipótesis de Silva-Tamayo et al., (2008), quienes asocian esta petrofacies principalmente con el Plutón de Amagá.

10. Conclusiones

Los conteos petrográficos y demás variables presentan una correlación lineal, lo que permite usar el método de distancia Euclidiana para el desarrollo del análisis multivariado, donde el gráfico estadístico de Humbert muestra que la mejor agrupación de las 151 muestras esta constituida por 7 clústeres (petrofacies cuantitativas) para la Formación Amagá, las cuales presentan composiciones predominantes que hacen posible inferir un ambiente de procedencia del material que las componen. Adicionalmente, permiten correlacionar en algunos casos secciones estratigráficas como (e.g. Pozo Venecia y el Pozo Cinco (1b)).

Las petrofacies en donde el cuarzo es el mineral dominante son asociadas al basamento de la Cordillera Central, Plutón de Amagá, Complejos Arquía y Quebradagrande. Ahora bien, dependiendo del tipo de cuarzo dominante, es posible definir la procedencia con mayor precisión. Por su parte, las petrofacies donde dominan líticos sedimentarios o volcánicos son asociadas a la Formación Combia por su actividad volcánica incipiente durante la acumulación del Miembro Superior o al retrabajamiento que sufrió el Miembro Inferior de la Formación Amagá.

Adicionalmente, las muestras que se agrupan en el campo de orógeno reciclado en el diagrama de Dickinson, son asociadas a los Complejos Arquía y Quebradagrande, Miembro Inferior de la Formación Amagá y Formación Combia; por otra parte, las muestras que se encuentran en el campo de bloque continental se relacionan principalmente al Complejo Quebradagrande por su carácter bimodal (afinidad volcánica al oeste y continental al este). Por último, las muestras agrupadas en el campo de arco magmático son asociadas únicamente al Plutón de Amagá.

El método usado en este trabajo para la determinación de petrofacies cuantitativas permite una mayor rapidez al momento de definir petrofacies en estudios de cuencas futuros, es de gran utilidad ya que además de disminuir tiempo, posibilita tomar en cuenta mas variables que las usadas tradicionalmente en la clasificación de Folk. En el presente estudio solo fueron tomadas algunas variables, sin embargo, existen otras (e.g redondez, porosidad) excluidas ya que no había información de estas en los conteos petrográficos empleados; en consecuencia, para futuros

trabajos se recomienda incluir dicha información para la generación de una base de datos mucho más robusta que posibilite obtener resultados con mayor nivel de exactitud.

11. Bibliografía

- Al-Baldawi, B.A., 2015. Applying the cluster analysis technique in logfacies determination for Mishrif Formation, Amara oil field, South Eastern Iraq. *Arabian Journal of Geosciences* 8, 3767–3776. <https://doi.org/10.1007/s12517-014-1490-z>
- Aspen, J.A., McCourt, W.J., Brook, M., 1987. Geometrical control of subduction-related magmatism: the Mesozoic and Cenozoic plutonic history of Western Colombia. *Journal of the Geological Society* 144. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.144.6.0893>
- Blandon, A., Parra, N., Gorin, G.E., Arango, F., 2008. Adapting palynological preparation methods in subbituminous and bituminous coals from Colombia to improve palynofacies and hydrocarbon source rock evaluations. *International Journal of Coal Geology* 73. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2007.02.008>
- Boehmke, B., Greenwell, B., 2019. Hands-on machine learning with R. Chapman and Hall/CRC.
- Borcard, D., Gillet, F., Legendre, P., 2018. Numerical Ecology with R Second Edition, Springer I. ed, Dairy Science & Technology, CRC Taylor & Francis Group. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-319-71404-2>
- Bustamante, C., Cardona, A., Archanjo, C.J., Bayona, G., Lara, M., Valencia, V., 2017. Geochemistry and isotopic signatures of Paleogene plutonic and detrital rocks of the Northern Andes of Colombia: A record of post-collisional arc magmatism. *Lithos* 277. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2016.11.025>
- Case, J., Duran, L., López, A., Moore, W., 1971. Tectonic Investigations in Western Colombia and Eastern Panama. *GSA Bulletin* 82, 2685–2712. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1971\)82\[2685:TIIWCA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1971)82[2685:TIIWCA]2.0.CO;2)
- Cediel, F., Shaw, R.P., Carlos Cáceres, 2003. 07. Tectonic Assembly of the Northern Andean Block. *AAPG Memoir* 79 79, 815–848.
- Charrad, M., Ghazzali, N., Laval, U., Niknafs, A., 2014. NbClust: An R Package for Determining the Relevant Number of Clusters in a Data Set Véronique Boiteau. *JSS Journal of Statistical* 61.
- Clarke, K.R., 1993. Non-parametric multivariate analyses of changes in community structure. *Australian Journal of Ecology* 18, 117–143.
- Dickinson, W., 1985. Interpreting provenance relations from detrital modes of sandstones, en: *Provenance of arenites*. Springer, Dordrecht, pp. 333–365.
- Dickinson, W.R., Rich, E.I., 1972. Petrologic intervals and petrofacies in the great valley sequence, Sacramento valley, California. *Bulletin of the Geological Society of America* 83, 3007–3024. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1972\)83\[3007:PIAPIT\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1972)83[3007:PIAPIT]2.0.CO;2)
- Fernandes, L.P., 2020. A Clustering-based Approach to Identify Petrofacies from Petrographic Data. Tesis de Maestría. Universidad Federal de Río Grande.
- Folk, R.L., 1954. The Distinction between Grain Size and Mineral Composition in Sedimentary-Rock Nomenclature. Source: *The Journal of Geology* 62, 344–359.
- Gómez, J., 2018. Definición de la calidad de las arenas yacimiento mediante la interpretación de fases minerales por métodos analíticos (drx) y su agrupamiento multivariable de las muestras del pozo bn-848 del Campo Boscán. Proyecto de grado. Universidad Central de Venezuela.
- González, H., 1980. Geología de las Planchas 167 (Sonson) y 187 (Salamina).
- Grosse, E., 1926. El Terciario Carbonífero De Antioquia. Berlin.

- Guzmán, C., Sierra, G., 1984. Ambientes sedimentarios en la Formación Amagá. Universidad Nacional de Medellín.
- Hammer, Ø., Harper, D.A.T., 2006. Paleontological Data Analysis, Paleontological Data Analysis. <https://doi.org/10.1002/9780470750711>
- Jing, J., Ke, S., Li, T., Wang, T., 2021. Energy method of geophysical logging lithology based on K-means dynamic clustering analysis. *Environmental Technology and Innovation* 23, 101534. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101534>
- Johnsson, M.J., 1993. The system controlling the composition of clastic sediments. *Special Paper of the Geological Society of America* 284, 1–19. <https://doi.org/10.1130/SPE284-p1>
- Lara, M., Salazar-Franco, A.M., Silva-Tamayo, J.C., 2018. Provenance of the Cenozoic siliciclastic intramontane Amagá Formation: Implications for the early Miocene collision between Central and South America. *Sedimentary Geology* 373, 147–162. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2018.06.003>
- Leal-Mejía, H., Melgarejo, I., Draper, J.C., Shaw, R.P., 2011. Phanerozoic gold metallogeny in the Colombian Andes, en: *Proceedings let's talk ore deposits, SGA biennial meeting, Antofagasta, Chile*.
- Marulanda, C.O., Sánchez, C.A., 2013. Petrografía, petrología y análisis de procedencia de unidades paleógenas en las cuencas Cesar - Ranchería y Catatumbo. *Boletín de Geología* 35, 67–80.
- Maydeu, A., García, C., 2010. Goodness-of-fit testing. *International Encyclopedia of Education* 190–196. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-044894-7.01333-6>
- McCourt, W.J., Aspden, J.A., Brook, M., 1984. New geological and geochronological data from the Colombian Andes: continental growth by multiple accretion. *Journal of the Geological Society* 141. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.141.5.0831>
- Mesa, J., 2012. La Formación Amagá en El Pozo la Loma – 1 y la sección Sabaleticas: sucesión diagenéticamente inmadura del Eoceno – Mioceno por análisis de múltiples herramientas. Proyecto de grado. Universidad Eafit. Medellín-Colombia. EAFIT.
- Moreno, N., 2011. Análisis de la petrología, área fuente y diagénesis de las areniscas de la Formación Amagá en los pozos Venecia 1 y El Cinco (1B). Proyecto de grado. Universidad Eafit. Medellín-Colombia. EAFIT.
- Moreno Sánchez, M., Gómez Cruz, A., Toro, L., 2007. Proveniencia Del Material Clástico Del Complejo Quebradagrande Y Su Relación Con Los Complejos Quebradagrande Y Su Relación Con Los Complejos Estructurales Adyacentes. *Boletín de Ciencias de la Tierra* 1, 27–38.
- Nivia, A., Marriner, G.F., Kerr, A.C., Tarney, J., 2006. The Quebradagrande Complex: A Lower Cretaceous ensialic marginal basin in the Central Cordillera of the Colombian Andes. *Journal of South American Earth Sciences* 21, 423–436. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2006.07.002>
- Oksanen, J., Guillaume, F., Friendly, M., Kindt, R., Legendre, P., McGlinn, D., Minchin, P., O'Hara, R., Simpson, G., Solymos, P., Stevens, H., Szoecs, E., Wagner, H., 2020. *vegan: Community Ecology Package* [WWW Document]. *vegan: Community Ecology Package*. URL <https://cran.r-project.org/web/packages/vegan/index.html>
- Ortiz, J., Jaramillo, C., 2020. *SDAR: Stratigraphic Data Analysis* [WWW Document]. *SDAR: Stratigraphic Data Analysis*. URL <https://cran.r-project.org/web/packages/SDAR/index.html>
- Páez, L.A., 2013. Análisis estratigráfico y de proveniencia del miembro superior de la Formación Amagá en los sectores de La Pintada y Valparaiso (cuenca Amagá, Andes Noroccidentales).

- Tesis de maestría. Universidad Eafit. Medellín-Colombia. EAFIT.
- Piedrahita, V., Bernet, M., Chadima, M., Sierra, G.M., Marín-Cerón, M.I., Toro, G.E., 2017. Detrital zircon fission-track thermochronology and magnetic fabric of the Amagá Formation (Colombia): Intracontinental deformation and exhumation events in the northwestern Andes. *Sedimentary Geology* 356, 26–42. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2017.05.003>
- Piedrahita, V.A., Molina-Garza, R.S., Sierra, G.M., Duque-Trujillo, J.F., 2017. Paleomagnetism and magnetic fabrics of Mio-Pliocene hypabyssal rocks of the Combia event, Colombia: tectonic implications. *Studia Geophysica et Geodaetica* 61, 772–800. <https://doi.org/10.1007/s11200-016-0372-0>
- Ramírez, D., López Cuevas, A., Sierra Lopera, G., Toro Villegas, G., 2006. Edad y proveniencia de las rocas volcánico sedimentarias de la Formación Combia en el suroccidente antioqueño Colombia. *Boletín de Ciencias de la Tierra* 0, 09–26.
- Restrepo-Moreno, S.A., Foster, D.A., Stockli, D.F., Parra-Sánchez, L.N., 2009. Long-term erosion and exhumation of the “Altiplano Antioqueño”, Northern Andes (Colombia) from apatite (U-Th)/He thermochronology. *Earth and Planetary Science Letters* 278, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.09.037>
- Rodríguez, G., Arango, M., Bermúdez, J., 2012. Batolito de Sabanalarga, plutonismo de arco en la zona de sutura entre las cortezas oceánica y continental de los Andes del Norte. *Boletín de Ciencias de la Tierra* 32, 81–98.
- Sánchez, A., 2018. Análisis comparativo de diferentes métodos de agrupación para el tratamiento de datos de expresión genética. Tesis de Maestría. Universidad Abierta de Cataluña. España. Universidad Abierta de Cataluña, España.
- Sierra, G., MacDonald, W., 2001. Correlation of Early Tertiary Terrestrial Deposits of Amagá Basin, Cauca Depression, Colombia Andes. *American Geophysical Union* 82, 125–.
- Sierra, G.M., Marín, M.I., 2012. Amagá, Cauca Patía Basin. *Petroleum Geology of Colombia*. Editor. Fabio Cediell 2.
- Sierra, G.M., Silva T., J.C., Correa O., L.G., 2003. Estratigrafía secuencial de la Formación Amagá. *Boletín de Ciencias de la Tierra* 9–22.
- Silva-Tamayo, J.C., Sierra, G.M., Correa, L.G., 2008. Tectonic and climate driven fluctuations in the stratigraphic base level of a Cenozoic continental coal basin, northwestern Andes. *Journal of South American Earth Sciences* 26, 369–382. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2008.02.001>
- Toro, G., Restrepo, J.J., Poupeau, G., Sáenz, E., Azdimousa, A., 1999. Datación por trazas de fisión de circones rosados asociados a la secuencia volcano-sedimentaria de Irra (Caldas). *Boletín Ciencias de la Tierra* 13, 28–34.
- Villagómez, D., Spikings, R., 2013. Thermochronology and tectonics of the Central and Western Cordilleras of Colombia: Early Cretaceous–Tertiary evolution of the Northern Andes. *Lithos* 160–161. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.12.008>

Anexos

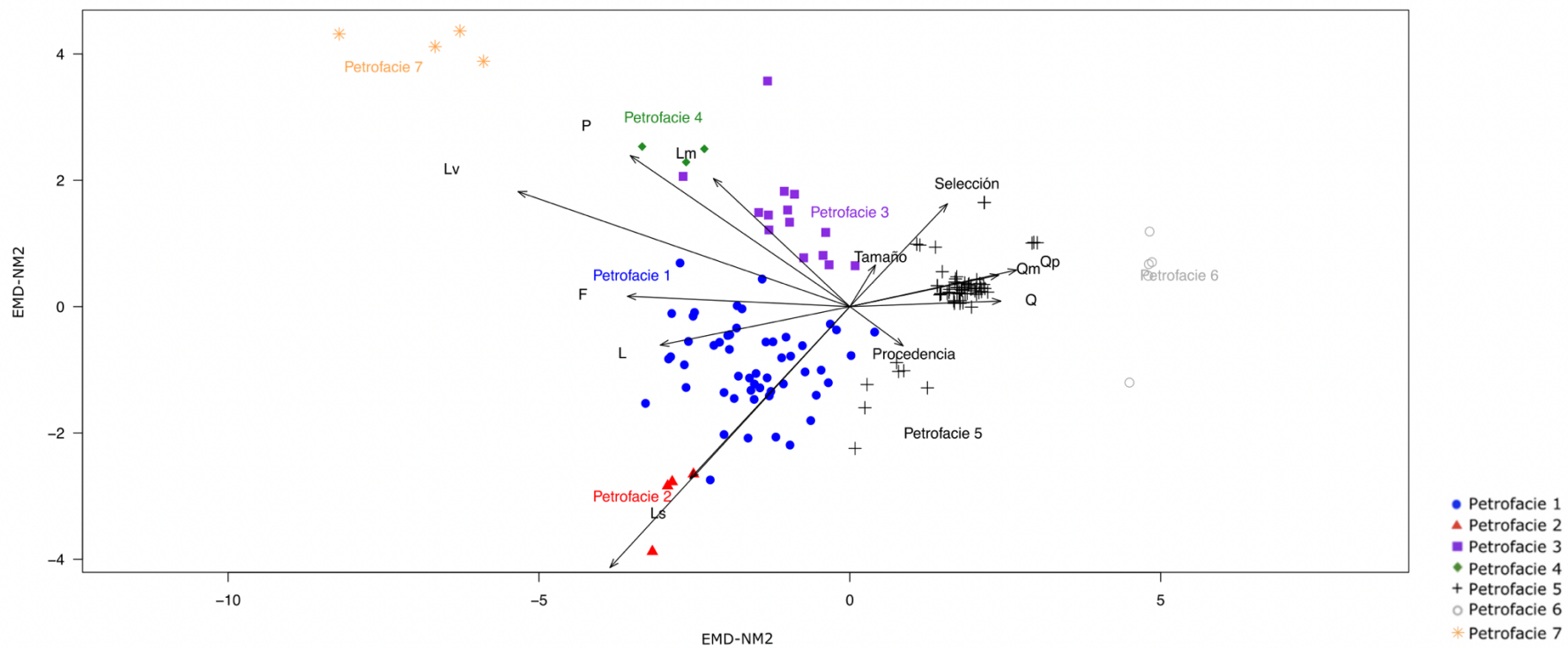
Muestra	Q	F	L	Qm	Op	P	K	Lv	Ls	Lm	Tamaño	Selección	Procedencia
LP-002-1	70.5	5	24.5	44.4	26.1	1.9	3.1	8.1	10.8	5.6	3	1	2
LP-002-2	69.2	3	27.7	0.6	2.5	0.6	2.5	9.5	10.9	7.3	3	1	2
LP-003-3	54.5	0.3	45	33.9	20.6	0.2	0.3	6.2	28.2	10.6	2	1	2
LP-004-1	63.6	5.5	29.9	43	20.6	3.5	3	9.2	12.2	8.5	2	1	2
LP-005-1	17.3	7.3	35.4	35	22.3	2.7	4.6	3	13	14.9	8	1	2
LP-006-3	53.6	7.7	38.7	27.9	25.7	3.5	4.2	10	27.3	7.3	3	1	2
LP-006-4	56.5	7.8	35.7	35.5	21	3.5	4.3	4.5	28.8	2.4	3	1	2
LP-019-1	58.3	6.8	34.9	30.5	27.8	3.7	3.1	6.4	24.4	4.1	3	1	2
LP-020-1	55.3	9.2	35.5	28.4	26.9	4.7	4.5	8.5	20.4	6.6	3	1	2
LP-023-1	52.3	8.7	39	27.6	24.7	4.6	4.1	9.7	22	7.3	2	1	2
LP-022-1	57.4	10	32.3	29.1	28.3	4.9	5.4	4	24.8	3.5	2	1	2
LP-034-1	56.8	8.3	34.9	31.1	25.7	4	4.3	8.1	21.7	5.1	1	1	2
LP-035-2	53.3	9.7	38	27.5	24.8	5.4	4.3	7.6	24.1	6.3	1	1	2
LP-035-3	54.5	11	35	25.1	29.4	5	5.5	6.2	25.6	3.2	2	1	2
LP-036-1	56.6	10	33.2	31.1	25.5	5.5	4.7	8.2	20.6	4.4	2	1	2
LP-007-2	59.6	8.7	31.7	37.1	22.5	3.6	5.1	2.3	27.6	1.8	4	1	2
LP-009-1	69.3	5	25.7	40.2	29.1	2	3	1.1	21.4	2.5	2	1	2
LP-010-1	64.3	5.5	30.2	37.6	26.7	2.3	3.2	8	18.7	5.5	2	1	2
LP-011-1	58	8.5	33.5	34.6	23.4	4.4	4.1	8.9	18.4	6.2	3	1	2
LP-023-1	50	13	37.2	28.2	21.8	7.7	5.1	6.4	27.4	3.4	2	1	2
LP-025-2	56.8	8.7	34.5	30.4	26.4	4.5	4.2	5.7	25.1	3.7	2	1	2
LP-025-3	52.3	9.2	38.5	26.5	25.8	5.1	4.1	8.1	25.4	5	2	1	2
LP-041-1	53.9	11	35.4	28.1	25.8	5.4	5.3	7.3	22.7	5.4	2	1	2
LP-029-1	50.8	12	37.6	28.2	22.6	6.5	5.1	9.3	20.9	7.4	2	1	2
LP-030-1	54.8	10	34.9	28.6	26.2	5.5	4.8	7.5	23.7	3.7	2	1	2
LP-032-1	48.1	14	38.4	26.9	21.2	7.7	5.8	6.7	25.9	5.8	2	1	2
LP-033-1	55.5	12	32.2	29.2	26.3	6.4	5.9	8.8	17.5	5.9	2	1	2
LP-014-1	50.3	16	34.1	26.2	24.1	9.4	6.2	10	18	6	3	2	2
LP-015-1	51.7	17	31.5	29.3	22.4	9.5	7.3	12	14.5	5.5	5	2	2
LP-017-1	53	17	29.8	28.7	24.3	10	7.2	9.5	12	5.3	3	2	2
LP-044-1	51.9	18	30.1	30	21.9	12	6	9.5	16.3	4.3	2	2	2
LP-049-1	51.8	17	31.1	29.6	22.7	11	6.2	10	16	2.9	10	1	2
LP-050-1	52.6	17	30.2	29.6	23	12	5.2	10	15.2	4.7	2	2	2
LP-050-2	49.5	18	33	27	22.5	11	6.7	11	17.6	4	2	2	2
LP-054-1	52	18	30	28.4	21	11	7.5	10	19.5	4.5	1	2	2
LP-061-1	51	18	31	30.8	20.2	12	6	10	16	4.7	1	2	2
LP-026-1	46	24	30.5	28.6	21.4	11	7.1	11	15.7	5.4	2	2	2
LP-027-1	48.3	21	30.7	27.3	21	12	9.5	10	19.2	5.3	1	2	2
LP-038-2	47.1	22	30.6	26.9	20.2	13	9.8	11	15.6	4.3	2	2	2
LP-038-8	48	23	29.1	25.2	22.8	13	9.8	11	14.5	3.3	2	2	2
CBMV (1) 017	77.2	3.3	19.48	69.4	3	1	1.9	0	1	0	1	2	2
CBMV (1) 025	59.39	9.45	31.16	52.4	4.1	4.6	3.8	0.3	22.7	6.2	1	2	2
CBMV (1) 028	40.78	15.44	43.08	31.1	3.2	4.1	6.7	3.1	31.2	3.5	1	2	2
CBMV (1) 035	55.92	11.57	32.51	46.3	4	4.1	5.4	4.7	20.1	4.2	3	1	2
CBMV (1) 038	39.22	9.43	51.31	32.8	2.9	4.4	4.7	11.4	24.6	9.8	3	3	2
CBMV (1) 041	35.82	13.5	50.68	35.2	1	13.8	5.8	18	21.3	6.6	3	1	2
CBMV (1) 044	36.26	16.92	46.82	27.8	5.4	7.2	6.9	20	22.5	1	2	1	2
CBMV (1) 053	40.24	12.38	47.38	34.7	2.4	6.3	4.8	17.3	23.4	3.8	3	2	2
CBMS(1b) 015	43.84	15.54	41.41	42.7	0.8	25.4	34.3	1	34.3	1	2	2	2
CBMS(1b) 017	44.8	17.94	37.26	40.1	1	8.3	7.8	15.6	20.5	2.9	2	2	2
CBMS(1b) 018	41.56	14.1	44.34	37.7	0.6	2.3	13.4	1.7	38.3	2	2.5	1	2
CBMS(1b) 020	48.38	19.21	32.41	44.7	0.3	17.1	0.3	27.8	27.8	2	2	2	2
CBMS(1b) 032	45.82	14.55	39.63	41.9	0.3	1	11.8	1	34.4	2.6	2	2	2
Lucia 1	94.3	0.0	6.0	79.0	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3	2	2
Lucia 2	95.1	3.0	5.0	72.0	83.0	2.0	1.0	0.0	4.2	0.9	3	2	2
Lucia 3	95.0	2.0	6.0	78.0	73.0	2.0	0.0	0.0	4.2	1.8	3	2	2
Lucia 4	95.5	1.0	5.0	76.0	71.0	1.0	0.0	0.0	2.6	0.6	3	2	2
Lucia 5	96.3	1.0	5.0	83.0	73.0	1.0	0.0	0.0	3.7	1.3	3	2	2
Lucia 6	96.2	0.0	6.0	82.0	68.0	0.0	0.0	0.0	2.0	4.0	3	2	2
Lucia 7	93.5	3.0	7.0	79.0	65.0	2.0	1.0	0.0	3.8	3.8	3	2	2
Lucia 8	93.5	3.0	7.0	79.0	65.0	2.0	1.0	0.0	3.8	3.2	3	2	2
Lucia 9	97.4	0.0	4.0	89.0	63.0	0.0	0.0	0.0	1.9	2.1	3	2	2
Lucia 10	91.8	3.0	9.0	78.0	57.0	3.0	0.0	0.0	6.1	2.9	3	2	2
Lucia 11	97.0	1.0	4.0	84.0	76.0	1.0	0.0	0.0	0.9	3.1	3	2	2
Lucia 12	93.5	3.0	7.0	79.0	64.0	3.0	0.0	0.0	4.3	2.7	3	2	2
Lucia 13	96.0	3.0	3.0	84.0	78.0	2.0	1.0	0.0	3.0	2.6	3	2	2
Lucia 14	94.4	5.0	4.0	83.0	69.0	3.0	2.0	0.0	1.0	3.0	3	2	2
Lucia 15	90.3	7.0	6.0	81.0	65.0	6.0	7.0	0.0	6.8	1.2	3	2	2
Lucia 16	89.6	7.0	7.0	80.0	91.0	7.0	0.0	0.0	2.9	4.1	3	2	2
Lucia 17	92.0	3.0	9.0	73.0	65.0	3.0	0.0	0.0	6.1	2.9	3	2	2
Lucia 18	92.0	3.0	7.0	73.0	65.0	3.0	0.0	0.0	6.1	2.9	3	2	2
Lucia 19	94.2	3.0	6.0	79.0	68.0	3.0	0.0	0.0	2.0	4.0	3	2	2
Lucia 20	94.7	1.0	7.0	75.0	69.0	1.0	0.0	0.0	4.2	2.8	3	2	2
Lucia 21	95.7	2.0	5.0	80.0	74.0	2.0	0.0	0.0	2.1	2.9	3	2	2
Lucia 22	95.7	2.0	5.0	80.0	75.0	2.0	0.0	0.0	2.1	2.9	3	2	2
Lucia 23	95.7	2.0	5.0	80.0	74.0	2.0	0.0	0.0	2.1	2.9	3	2	2
Lucia 24	93.2	2.0	8.0	79.0	58.0	2.0	0.0	0.0	5.0	3.0	3	2	2
Lucia 25	93.0	0.0	10.0	77.0	56.0	0.0	0.0	0.0	2.0	8.0	3	2	2
Lucia 26	94.3	2.0	7.0	79.0	69.0	2.0	0.0	0.0	3.4	3.6	3	2	2
Lucia 27	94.3	2.0	7.0	79.0	69.0	2.0	0.0	0.0	3.4	3.6	3	2	2
Lucia 28	94.3	2.0	7.0	79.0	69.0	2.0	0.0	0.0	3.4	3.6	3	2	2
Lucia 29	91.7	0.0	11.0	82.0	40.0	0.0	0.0	0.0	0.0	11.0	3	2	2
Lucia 30	94.9	2.0	6.0	77.0	62.0	2.0	0.0	0.0	3.6	2.9	3	2	2
Lucia 31	94.9	2.0	6.0	77.0	72.0	2.0	0.0	0.0	3.6	2.4	3	2	2
Lucia 32	94.2	0.0	8.0	86.0	44.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.0	3	2	2
Lucia 33	97.6	1.0	3.0	85.0	75.0	1.0	0.0	0.0	0.6	2.4	3	2	2
Lucia 34	96.8	0.0	5.0	84.0	69.0	0.0	0.0	0.0	2.0	3.0	3	2	2
Lucia 35	96.8	0.0	5.0	84.0	69.0	0.0	0.0	0.0	2.0	3.0	3	2	2
Lucia 36	97.6	0.0	4.0	79.0	82.0	0.0	0.0	0.0	2.2	1.8	3	2	2
Lucia 37	97.5	1.0	3.0	90.0	69.0	1.0	0.0	0.0	1.5	1.5	3	2	2
Lucia 38	96.9	0.0	5.0	85.0	70.0	0.0	0.0	0.0	1.2	0.9	3	2	2
Lucia 39	92.0	1.0	10.0	81.0	46.0	1.0	0.0	0.0	4.2	5.8	3	2	2
Lucia 40	92.0	1.0	10.0	81.0	46.0	1.0	0.0	0.0	4.2	5.8	3	2	2
Lucia 41	95.9	1.0	5.0	87.0	54.0	1.0	0.0	0.0	3.1	3.9	3	2	2
Lucia 42	94.7	3.0	5.0	87.0	56.0	2.0	1.0	0.0	1.9	3.2	3	2	2
Lucia 43	95.0	2.0	5.0	80.0	72.0	1.0	1.0	0.0	2.5	2.5	3	2	2
Lucia 44	94.9	2.0	6.0	80.0	68.0	1.0	1.0	0.0	2.0	4.0	3	2	2
Lucia 45	95.0	2.0	5.0	88.0	46.0	2.0	0.0	0.0	2.0	3.1	3	2	2
Lucia 46	94.9	1.0	7.0	76.0	72.0	1.0	0.0	0.0	1.0	3.8	3	2	2
Lucia 47	97.5	0.0	4.0	83.0	72.0	0.0	0.0	0.0	2.0	2.6	3	2	2
Lucia 48	94.7	1.0	7.0	81.0	62.0	1.0	0.0	0.0	4.0	3.0	3	2	2
Lucia 49	94.7	1.0	7.0	81.0	62.0	1.0	0.0	0.0	4.0	3.0	3	2	2
Lucia 50	94.2	0.0	8.0	85.0	45.0	0.0	0.0	0.0	4.5	3.5	3	2	2
Lucia 51	94.2	0.0	8.0	85.0	45.0	0.0	0.0	0.0	4.5	3.5	3	2	2
Lucia 52	96.2	1.0	5.0	85.0									

Variables	Q	F	L	Qm	Qp	P	K	Lv	Ls	Lm	Tamaño	Selección	Procedencia
Q	1	-0.7937805	-0.9678503	0.87620954	0.78681886	-0.5775986	-0.6729738	-0.7648289	-0.7897853	-0.4639616	0.26834678	0.43563233	0.33476774
F	-0.7937805	1	0.66131268	-0.650132	-0.5318355	0.87374965	0.59840512	0.74965546	0.41929603	0.30464298	-0.2050657	-0.0896509	-0.3834636
L	-0.9678503	0.66131268	1	-0.839387	-0.7710894	0.49680317	0.53977108	0.75171255	0.78271349	0.58865999	-0.1626208	-0.4667961	-0.3606502
Qm	0.87620954	-0.650132	-0.839387	1	0.68929821	-0.4319121	-0.5994969	-0.6221795	-0.7204116	-0.3011435	0.24410522	0.61939528	0.27657819
Qp	0.78681886	-0.5318355	-0.7710894	0.68929821	1	-0.3094828	-0.5345003	-0.5220177	-0.6421851	-0.3545137	0.14428827	0.48591198	0.28935173
P	-0.5775986	0.87374965	0.49680317	-0.4319121	-0.3094828	1	0.14859729	0.73972878	0.10446636	0.44631753	0.04942378	0.15582406	-0.4227147
K	-0.6729738	0.59840512	0.53977108	-0.5994969	-0.5345003	0.14859729	1	0.31902984	0.70769811	-0.0857194	-0.5413571	-0.4140381	-0.0852364
Lv	-0.7648289	0.74965546	0.75171255	-0.6221795	-0.5220177	0.73972878	0.31902984	1	0.27941663	0.5183864	-0.0082501	-0.1484465	-0.4566316
Ls	-0.7897853	0.41929603	0.78271349	-0.7204116	-0.6421851	0.10446636	0.70769811	0.27941663	1	0.13950673	-0.4501044	-0.5913222	-0.0779062
Lm	-0.4639616	0.30464298	0.58865999	-0.3011435	-0.3545137	0.44631753	-0.0857194	0.5183864	0.13950673	1	0.30571806	0.00431754	-0.3747659
Tamaño	0.26834678	-0.2050657	-0.1626208	0.24410522	0.14428827	0.04942378	-0.5413571	-0.0082501	-0.4501044	0.30571806	1	0.17193477	-0.18946
Selección	0.43563233	-0.0896509	-0.4667961	0.61939528	0.48591198	0.15582406	-0.4140381	-0.1484465	-0.5913222	0.00431754	0.17193477	1	0.2529182
Procedencia	0.33476774	-0.3834636	-0.3606502	0.27657819	0.28935173	-0.4227147	-0.0852364	-0.4566316	-0.0779062	-0.3747659	-0.18946	0.2529182	1

Anexo 2. Coeficientes de Pearson donde más del 90% presentan fuertes correlaciones positivas y negativas. Con color
coeficientes con muy baja correlación

Variables	Q	F	L	Qm	Qp	P	K	Lv	Ls	Lm	Tamaño	Selección	Procedencia
Q	< 2.2e-16	< 2.2e-16	< 2.2e-16	< 2.2e-16	< 2.2e-16	8.22E-15	< 2.2e-16	< 2.2e-16	< 2.2e-16	1.97E-09	0.000864	2.27E-08	2.65E-05
F	< 2.2e-16	< 2.2e-16	< 2.2e-16	< 2.2e-16	2.11E-12	< 2.2e-16	4.89E-16	< 2.2e-16	8.39E-08	0.0001428	0.01154	0.2736	1.17E-06
L	< 2.2e-16	< 2.2e-16	< 2.2e-16	< 2.2e-16	< 2.2e-16	8.70E-11	8.57E-13	< 2.2e-16	< 2.2e-16	1.88E-15	0.04604	1.53E-09	5.39E-06
Qm	< 2.2e-16	< 2.2e-16	< 2.2e-16	< 2.2e-16	< 2.2e-16	3.07E-08	4.20E-16	< 2.2e-16	< 2.2e-16	0.0001717	0.002523	< 2.2e-16	5.87E-04
Qp	< 2.2e-16	2.11E-12	< 2.2e-16	< 2.2e-16	< 2.2e-16	0.0001103	1.56E-12	6.25E-12	< 2.2e-16	7.97E-06	0.07713	2.54E-10	3.14E-04
P	8.22E-15	< 2.2e-16	8.70E-11	3.07E-08	0.0001103	< 2.2e-16	0.06862	< 2.2e-16	0.2018	9.26E-09	0.5467	0.05606	6.41E-08
K	< 2.2e-16	4.89E-16	8.57E-13	4.20E-16	1.56E-12	0.06862	< 2.2e-16	6.54E-05	< 2.2e-16	0.2953	7.13E-13	1.26E-07	0.2981
Lv	< 2.2e-16	< 2.2e-16	< 2.2e-16	< 2.2e-16	6.25E-12	< 2.2e-16	6.54E-05	< 2.2e-16	0.0005119	9.26E-12	0.9199	0.0689	3.79E-09
Ls	< 2.2e-16	8.39E-08	< 2.2e-16	< 2.2e-16	< 2.2e-16	0.2018	< 2.2e-16	0.0005119	< 2.2e-16	0.08756	6.70E-09	1.31E-15	0.3417
Lm	1.97E-09	0.0001428	1.88E-15	0.0001717	7.97E-06	9.26E-09	0.2953	9.26E-12	0.08756	< 2.2e-16	0.0001349	0.958	2.13E-06
Tamaño	0.000864	0.01154	0.04604	0.002523	0.07713	0.5467	7.13E-13	0.9199	6.70E-09	0.0001349	< 2.2e-16	0.03478	0.01981
Selección	2.27E-08	0.2736	1.53E-09	< 2.2e-16	2.54E-10	0.05606	1.26E-07	0.0689	1.31E-15	0.958	0.03478	< 2.2e-16	0.001729
Procedencia	2.65E-05	1.17E-06	5.39E-06	5.87E-04	3.14E-04	6.41E-08	0.2981	3.79E-09	0.3417	2.13E-06	0.01981	0.001729	< 2.2e-16

Anexo 3. Coeficientes de P-value entre las variables donde se observa que aproximadamente el 88% no rechazan la hipótesis
nula



Anexo 5. Representación de las 7 petrofacies en el diagrama EMD.NM